ChinaXiv合作期刊

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

近58 a中国北方地区极端气温时空变化及影响因素分析

焦文慧， 张 勃， 马 彬， 崔艳强， 黄 浩， 王晓丹

（西北师范大学地理与环境科学学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要：基于北方地区404个气象站1960—2017年逐日最高气温、最低气温资料，应用线性倾向估计法、Mann-Kendall法、滑动t检验法、累积距平法和相关分析法，分析了极端气温的时空变化特征，并探讨了气温指数的影响因素。研究表明：极端气温暖指数和极值指数呈上升趋势，冷指数和气温日较差呈下降趋势；变化幅度中冷指数大于暖指数，夜指数大于昼指数，西北地区极端气温指数变化幅度最大，东北地区最小。突变时间上，极端气温指数突变主要发生在20世纪80年代和90年代，暖指数和极高值指数晚于冷指数和极低值指数，东北地区极端气温指数突变时间最早，西北地区最晚，突变后极端暖事件和气温极值事件进入多发阶段，极端冷事件进入少发阶段。1988—2012年极端气温指数的变化响应了全球变暖停滞现象。多数极端气温指数与经纬度、海拔高度显著相关。北极涛动(*AO*)指数对极端气温的影响最强，对冷指数影响最明显。气溶胶光学厚度与多数冷指数呈负相关，而与多数暖指数呈正相关。

关 键 词： 极端气温；时空变化；影响因素；中国北方地区

文章编号：

chinaXiv:202101.00024v1

在全球变暖的背景下，温度的升高直接影响极端天气事件的发生，并增加自然灾害的频率和强度[1]，严重危害人类安全、社会建设及生态系统。耦合模式比较计划第五阶段（CMIP5）[2]模式预测结果显示，全球尺度上，21世纪末暖事件的频率和幅度将会增加，冷事件将会减少。国内外众多学者对极端气温事件的变化特征及影响因素进行了研究：SUPARI等[3]对印度尼西亚过去30 a的极端气候研究发现，冷昼（夜）减少，暖昼（夜）增多。KARL等[4]对美国极端气温的研究表明，美国极端最低温度在过去几十年有显著的上升趋势，且霜冻日数明显减少。国内许多学者研究了我国不同地区的极端气温事件[5-12]，发现冷事件逐渐减少，暖事件逐渐增多，且存在区域差异。极端气温的影响因素非常复杂，地理位置[9-10]，大尺度环流[9,13-15]，温室气体排放[16]、气溶胶[17]、热岛效应[18]、地表覆盖变化[19]、云量变化[20]等都对极端气温有重要影响，本文通过分析地理位置、大气环流以及气溶胶光学厚度（*AOD*）对极端气温事件的影响，为了解北方地区极端气温事件的成因提供科学依据。

尽管已经有许多学者对北方地区的极端气温变化进行了大量研究[11-12]，但大都是对最高、最低气温的研究，而针对极端气温的全面分析尚不多见，以往的研究因站点较少、资料截至年份较早，且指标较少等因素导致对北方地区整体的极端气温事件变化特征认识尚不透彻，本文在借鉴前人研究的基础上，选用北方地区境内尽可能多的、且能涵盖研究区域基本特征的气象站历史资料对北方地区近58 a极端气温的时空变化进行了全面深入的分析，有助于深入掌握北方地区极端气温变化特征，对开展气象灾害预测预警研究，减少极端气温事件对当地生产生活的不利影响方面有重要意义。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

中国北方地区地域辽阔（图1），东西跨度大（介

收稿日期：2019-07-28； **修订日期：**2020-01-05
基金项目：国家自然科学基金项目（41561024）
作者简介：焦文慧（1995-），女，硕士，研究方向为区域环境与资源开发研究. E-mail: jiaowenhuixlt@163.com
通讯作者：张勃，男，博士生导师，教授. E-mail: zhangbo@nwnu.edu.cn

ChinaXiv合作期刊

于33.24°～53.28 °N，75.14°～132.58 °E之间）。包括东北（黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古东部）、华北（河北、北京、天津、山西、山东、河南、内蒙古中部）和西北（新疆、青海、甘肃、宁夏、陕西、内蒙古西部）[21]。地势差异大，自西向东横跨三级阶梯，地貌复杂多样；气候类型多样，包括季风气候，温带大陆性气候和高原山地气候。

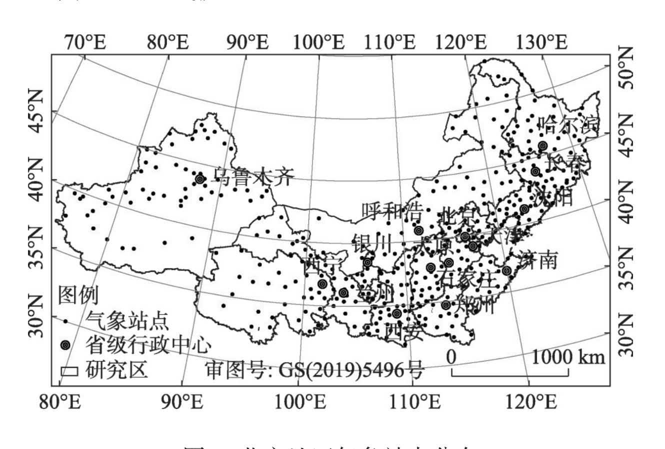


图1 北方地区气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the northern China

1.2 资料

选用北方地区404个气象站点1960—2017年逐日最高气温、最低气温资料，数据来源于中国气象数据网（http://cdc.cma.gov.cn）。对个别站点的缺测数据采用回归法进行插补，并用RClimDex软件对资料进行异常值和错误值筛选。

北极涛动（*AO*）、北大西洋涛动（*NAO*）、厄尔尼诺-南方涛动（*ENSO*）等4个环流指数的逐月数据来源于http://www.cpc.noaa.gov/，其中*ENSO*指数用Nino3.4区（5°S～5°N，170°W～120°W）海温指数（*SOI*）和多变量*ENSO*指数（*MEI*）表示。气溶胶光学厚度（*AOD*）数据来源于https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/order，时间序列为2007—2016年，通过ENVI/IDL语言和HDF4函数库对数据进行重投影、镶嵌、裁剪等处理，提取出北方地区各站点的*AOD*数据。

1.3 方法

采用世界气象组织（WMO）确定的16项极端气温指数，分为4种类型[6]（表1），各指数均在R语言的RclimDex1.0中完成计算。极端气温指数变化趋势采用线性方程[22]进行拟合；利用Mann-Kendall（M-K）非参数检验法[23-24]对趋势进行显著性检验；采用M-K法、滑动*t*检验法[25]和累积距平法[26]进行突变分析；相关性分析利用SPSS软件完成。

2 结果与分析

2.1 极端气温的时间变化

由表2得，近58 a绝对指数*FD*0、*ID*0呈显著下降趋势，*SU*25和*TR*20呈显著上升趋势。相对指数*TN*90*P*、*TX*90*P*呈显著上升趋势，*TN*10*P*、*TX*10*P*呈显著下降趋势；极值指数*TXx*、*TNn*、*TXn*、*TNx*均呈显

表1 极端气温指数定义

Tab. 1 Definitions of extreme air temperature indices

类别	符号	名称	定义及单位
绝对指数	*FD*0	霜冻日数	日最低气温＜0 ℃的天数（d）
	*ID*0	冰冻日数	日最高气温＜0 ℃的天数（d）
	*SU*25	夏日日数	日最高气温＞25 ℃的天数（d）
	*TR*20	热夜日数	日最低气温＞20 ℃的天数（d）
相对指数	*TN*90*P*	暖夜日数	日最低气温＞90%分位值的天数（d）
	*TX*90*P*	暖昼日数	日最高气温＞90%分位值的天数（d）
	*TN*10*P*	冷夜日数	日最低气温＜10%分位值的天数（d）
	*TX*10*P*	冷昼日数	日最高气温＜10%分位值的天数（d）
极值指数	*TXx*	日最高气温极大值	日最高气温的极大值（℃）
	TXn	日最高气温极小值	日最高气温的极小值（℃）
	TNn	日最低气温极小值	日最低气温的极小值（℃）
	TNx	日最低气温极大值	日最低气温的极大值（℃）
其他指数	*DTR*	气温日较差	日最高气温与最低气温的差值（℃）
	GSL	作物生长季	日平均气温＞5 ℃的天数（d）
	CSDI	冷持续日数	连续6 d日最低气温＜10%分位值的天数（d）
	WSDI	暖持续日数	连续6 d日最高气温＞90%分位值的天数（d）

chinaXiv:202101.00024v1

ChinaXiv合作期刊

表2 极端气温指数的变化趋势[d·(10 a)$^{-1}$或℃·(10 a)$^{-1}$]

Tab. 2 Trends of extreme air temperature indices [d·(10 a)$^{-1}$ or ℃·(10 a)$^{-1}$]

指数	北方地区				全国[28]	全球[29]
	研究区	东北	华北	西北		
FD0	−3.53**	−3.02**	−3.86**	−3.66**	−3.73*	—
ID0	−1.89**	−1.23**	−1.92**	−2.31**	—	—
SU25	2.45**	2.74**	2.33**	2.33**	1.18	—
TR20	1.62**	1.63**	2.06**	1.33**	—	—
TN90P	3.93**	3.47**	3.94**	4.23**	1.75*	1.58*
TX90P	2.66**	1.80**	1.81**	2.86**	0.62	0.89*
TN10P	−4.02**	−3.92**	−3.96**	−4.12**	−2.06*	−1.26*
TX10P	−1.87**	−1.67**	−1.71**	−2.11**	−0.47	−0.62*
TXx	0.19*	0.20	0.10	0.23**	0.07	0.21*
TXn	0.33*	0.35	0.27	0.34**	0.35*	0.37
TNn	0.54**	0.62**	0.55**	0.49**	0.63*	0.71*
TNx	0.28**	0.24**	0.28**	0.31**	0.21*	0.30*
DTR	−0.16**	−0.20**	−0.16**	−0.14**	−0.18*	−0.08*
GSL	3.07**	2.60**	3.22**	3.31**	3.04*	—
CSDI	−0.94**	−0.76**	−0.72**	−1.20**	—	—
WSDI	0.95**	0.78**	0.69**	1.22**	—	—

注:*、**分别表示通过0.05和0.01显著性检验水平,下同

著上升趋势;*GSL*、*WSDI*呈显著上升趋势,*DTR*、*CSDI*呈显著下降趋势。同时发现在变化幅度上:夜指数(*TN90P*、*TN10P*)大于昼指数(*TX90P*、*TX10P*),极低值指数(*TNn*、*TXn*)大于极高值指数(*TXx*、*TNx*),与之相关的极端气温冷指数(*FD0*、*ID0*、*TN10P*、*TX10P*、*CSDI*)大于暖指数(*TR20*、*SU25*、*TN90P*、*TX90P*、*WSDI*),尤以华北和东北地区最显著,表明研究区近58 a的气温升高,最低气温升温的贡献是主要的,这与郭志梅等[27]的研究结果相一致。

各分区极端气温指数变化与整个研究区基本一致,但各分区之间存在差异:*TXx*、*TXn*仅在西北地区变化显著,*SU25*、*TNn*、*TXn*、*DTR*在东北地区变幅最大,*TR20*在华北地区变幅最大,其余指数在西北地区变幅最大,可见极端气温指数的变化幅度在西北地区较大,在东北地区较小。

对比北方地区与全球、全国相同时段极端气温指数变化,发现北方地区极端气温指数变化趋势与全国和全球一致,但多数指数的变化幅度在北方地区要比全球和全国更明显。

2.2 极端气温的空间变化

2.2.1 绝对指数 从图2看,大部分站点的*FD0*呈显著下降趋势,华北平原东部、内蒙古高原中部、黄土高原东部、天山东部以及青海和宁夏地区降幅较大,平均为6 d·(10 a)$^{-1}$。大部分站点的*ID0*呈下降趋势,约57%的站点下降趋势显著,主要分布在黄土高原地区以及山东和青海地区,黄土高原东北部和青海地区降幅较大,平均为4 d·(10 a)$^{-1}$大部分站点的*SU25*和*TR20*呈显著上升趋势,其中黄土高原、内蒙古高原东部、祁连山、昆仑山以及大兴安岭地区*SU25*升幅较大,平均为4 d·(10 a)$^{-1}$,华北平原、

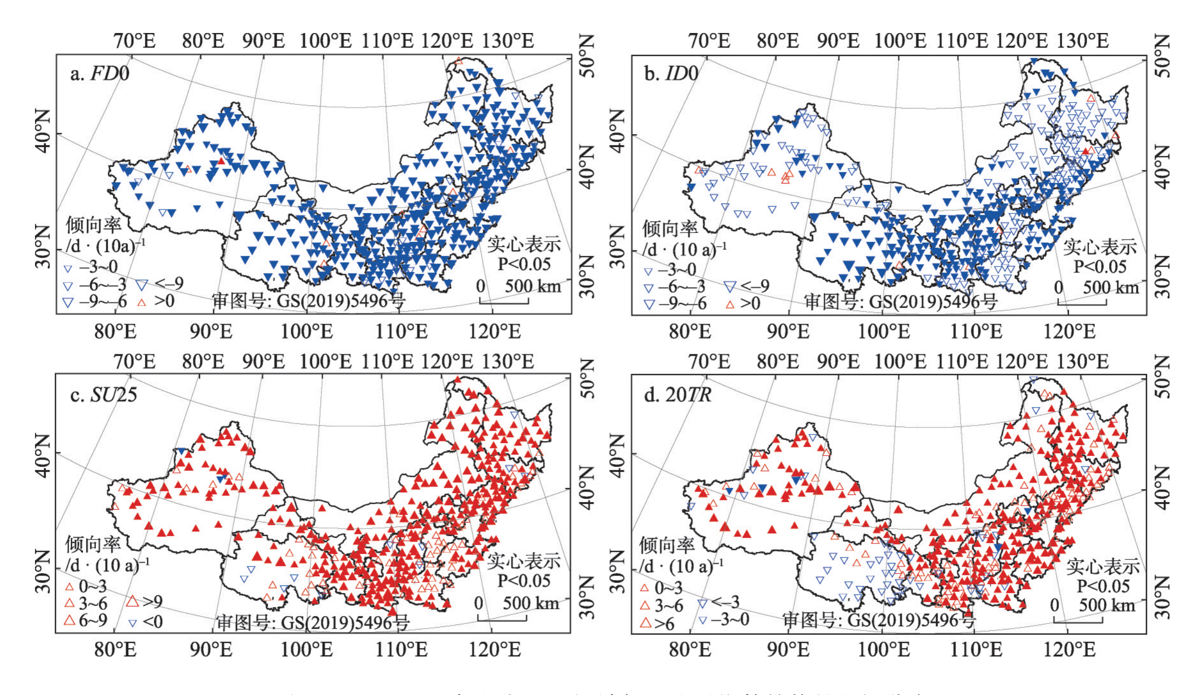


图2 1960—2017年北方地区极端气温绝对指数趋势的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution in absolute indices of extreme temperature events in the northern China from 1960 to 2017

chinaXiv:202101.00024v1

ChinaXiv合作期刊

东北平原西部和南部、秦岭以及天山和昆仑山地区*TR*20升幅较大，平均为4 d·(10 a)$^{-1}$，*TR*20呈下降趋势的站点集中分布在青海地区。

2.2.2 相对指数 由图3得知，大部分站点的*TN*90*P*和*TX*90*P*呈显著上升趋势，其中华北平原中部和东部、东北平原西部、祁连山、秦岭、天山地区以及新疆北部、宁夏和青海地区*TN*90*P*升幅较大，平均为6 d·(10 a)$^{-1}$，黄土高原、秦岭、祁连山、天山东部以及青海地区*TX*90*P*升幅较大，平均为4 d·(10 a)$^{-1}$，*TX*90*P*呈下降趋势的站点主要分布在河北南部和河南。大部分站点的*TN*10*P*和*TX*10*P*呈显著下降趋势，天山、昆仑山、内蒙古高原、大兴安岭、华北平原东部、黄土高原东部以及新疆北部和青海北部*TN*10*P*降幅较大，平均为6 d·(10 a)$^{-1}$，秦岭和青海地区*TX*10*P*降幅较大，平均为4 d·(10 a)$^{-1}$。

2.2.3 极值指数 由图4得知，大部分地区极值指数呈上升趋势，约40%的站点*TXx*上升趋势显著，黄土高原、祁连山和秦岭地区以及青海东部和内蒙古东部升幅较大，平均为0.5 ℃·(10 a)$^{-1}$，呈下降趋势的站点主要分布在华北平原。约有24%的站点TXn上升趋势显著，主要分布在秦岭和青海北部，东北平原北部和南部、内蒙古高原中部、秦岭、天山以及新疆北部和青海升幅较大，平均为0.5 ℃·(10 a)$^{-1}$。约69%的站点*TNn*上升趋势显著，东北平原、华北平原、内蒙古高原中部、天山地区以及青海东北部和新疆北部升幅较大，平均为0.8 ℃·(10 a)$^{-1}$。有约74%的站点*TNx*上升趋势显著，天山、祁连山、内蒙古高原以及新疆北部和青海北部升幅较大，平均为0.6 ℃·(10 a)$^{-1}$。

2.2.4 其他指数 由图5，大部分站点的*WSDI*呈上升趋势，约41%的站点上升趋势显著，主要分布在天山、昆仑山、秦岭、内蒙古高原地区以及宁夏北部，天山、昆仑山、黄土高原地区以及青海东部和南部升幅较大，平均为2 d·(10 a)$^{-1}$。大部分站点的*CSDI*呈下降趋势，约40%的站点下降趋势显著，显著下降的站点与*WSDI*显著上升站点的分布基本一致，天山、昆仑山、内蒙古高原地区以及青海西北部、新疆北部和山西南部降幅较大，平均为2.5 d·(10 a)$^{-1}$。大部分站点的*GSL*呈显著上升趋势，黄土高原、内蒙古高原、祁连山、秦岭地区以及青海升幅较大，平均为5 d·(10 a)$^{-1}$。大部分站点的*DTR*下降趋势显著，东北平原西部、华北平原西部、内蒙古高原中部、天山地区以及新疆北部降幅较大，平均为0.4 ℃·(10 a)$^{-1}$，呈上升趋势的站点主要分布在黄土高原中部。

2.3 极端气温指数的突变分析

对北方地区和各分区的极端气温指数进行突变分析，因篇幅问题，仅将北方地区极值指数的图

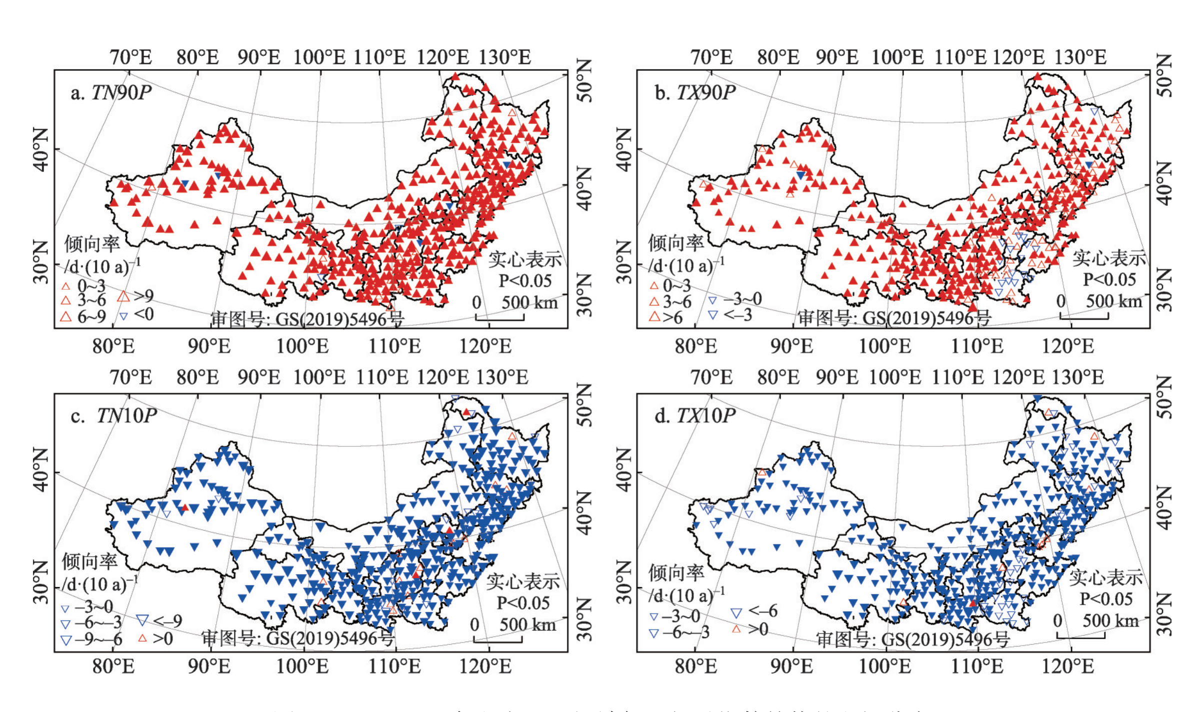


图3 1960—2017年北方地区极端气温相对指数趋势的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution in relative indices of extreme temperature events in the northern China from 1960 to 2017

chinaXiv:202101.00024v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202101.00024v1

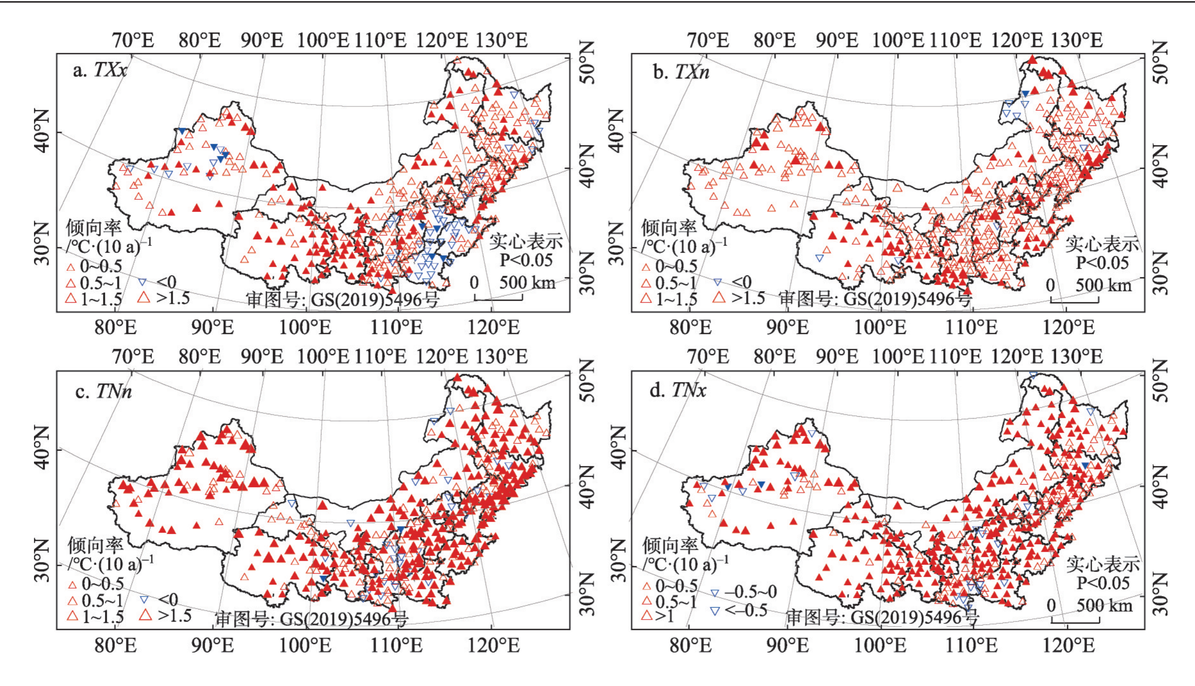


图4 1960—2017年北方地区极端气温极值指数趋势的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution in extremal indices of extreme temperature events in the northern China from 1960 to 2017

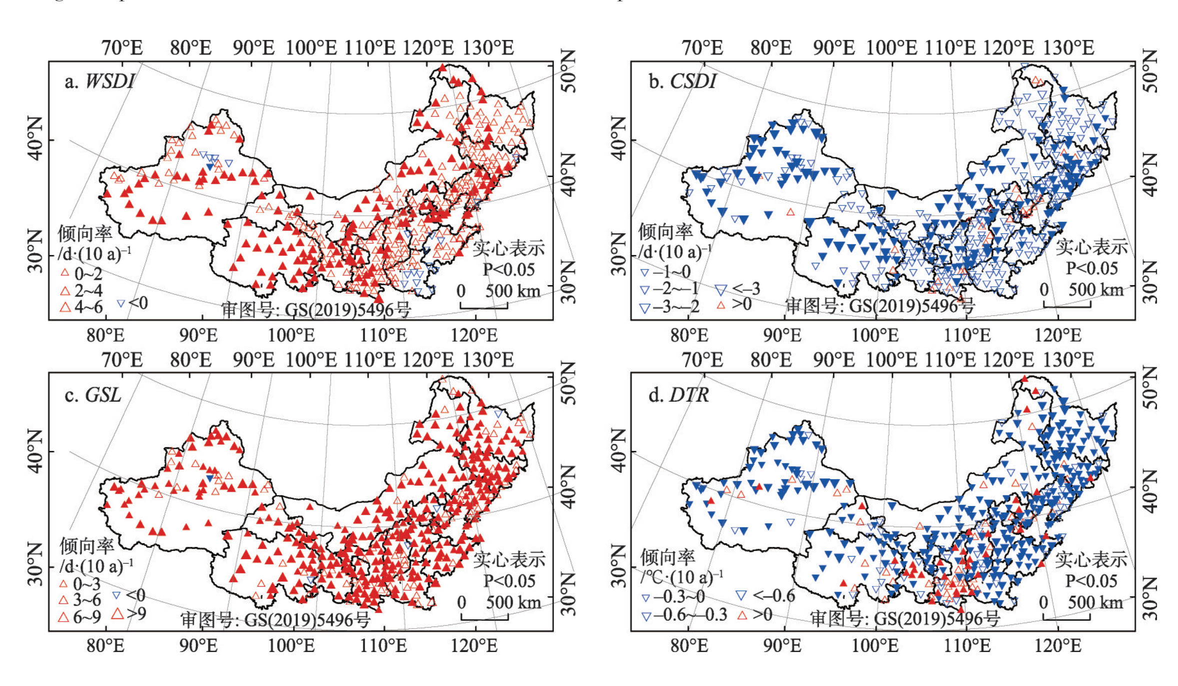


图5 1960—2017年北方地区极端气温其他指数趋势的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of other indices of extreme temperature events in the northern China from 1960 to 2017

列出(图6),其余指数的突变年见表3。北方地区极值指数均为波动上升趋势,由图6(a),*TXx*的M-K突变检验表明,*UF*、*UB*曲线在置信度区间内有多个交点,突变点不准确,而*TXx*的累积距平值在1996年之前呈下降趋势,之后呈上升趋势,说明*TXx*在1996年发生突变。结合M-K突变检验、累积距平以及滑动t检验,综合判断出北方地区*TXn*、*TNn*和*TNx*分别在1987、1981年和1997年发生突变。

由表3得北方地区极端气温指数突变年存在两个峰值:20世纪80年代和90年代。多数冷指数和极低值指数的突变发生在80年代。多数暖指数和极高值指数的突变发生在90年代,可见在突变时间上,冷指数和极低值指数早于暖指数和极高值指数。

各分区极端气温指数突变结果与北方地区类似,但在突变时间上存在差异:*SU*25、*TX*10*P*和*CSDI*在华北地区突变较早,*TNn*和*DTR*在西北地区突变

ChinaXiv合作期刊

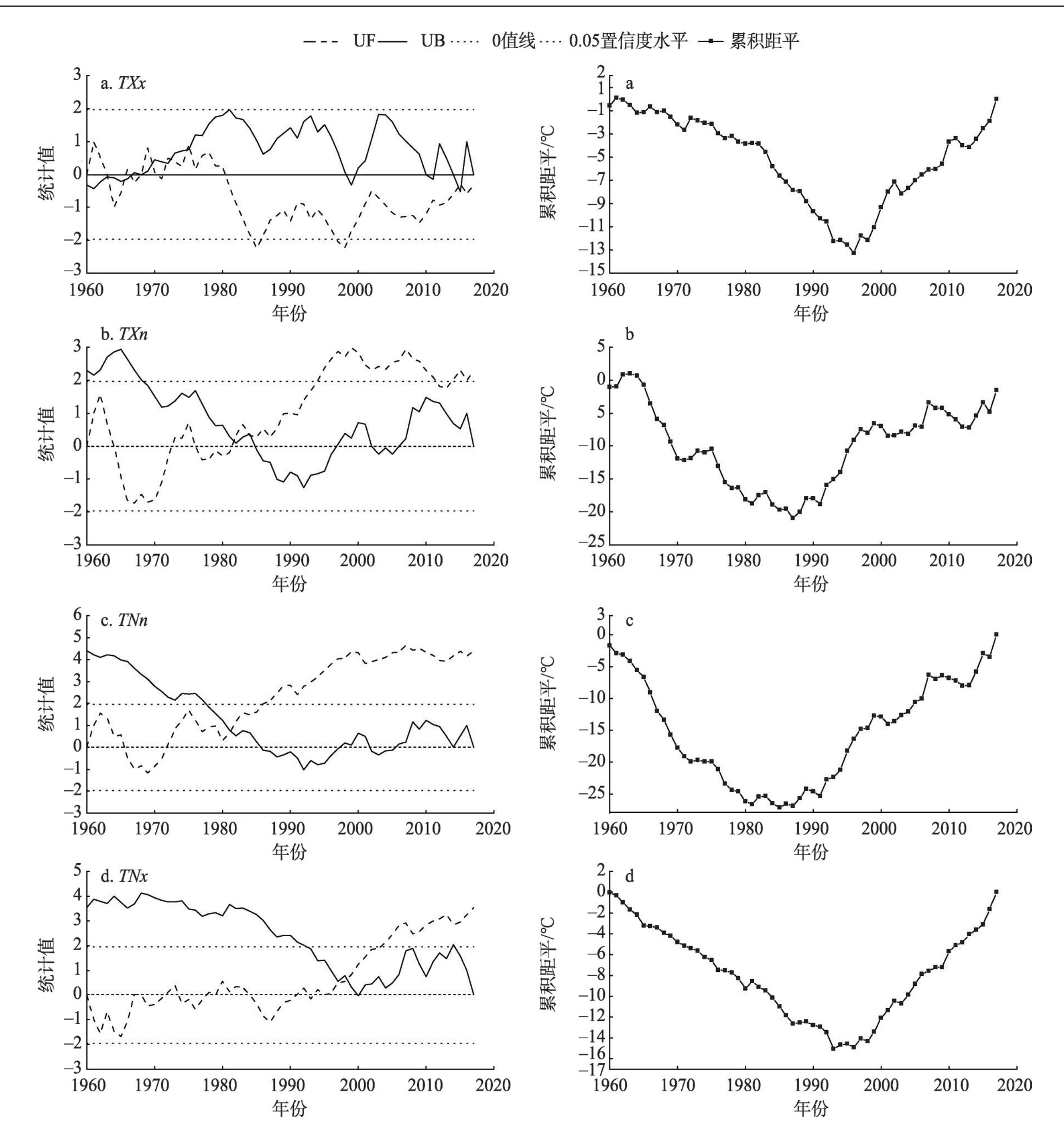


图6 1960—2017年北方地区极端气温指数极值指数M-K突变检验和累积距平值

Fig. 6 M-K mutation test and cumulative anomaly of extreme temperature extremal indices in the northern China from 1960 to 2017

较早，其余指数在东北地区突变较早，故东北地区极端气温指数突变时间最早，华北地区次之，西北地区最晚，这与前人[30]的研究结果一致；从各指数突变前后趋势来看，冷指数经历了由多到少的突变，暖指数和极值指数经历了由少到多的突变，因此突变后极端冷事件进入少发阶段，极端暖事件和气温极值事件进入多发阶段。

2.4 全球变暖停滞期间极端气温的变化

1998—2012年的全球变暖停滞(hiatus)现象近年来受到各界的广泛关注，有研究[31-32]证实气候变暖停滞这一现象确实存在，那极端气温对hiatus事件是如何响应的呢?

由表4，1960-1997年冷指数呈下降趋势，暖指数和除*TXx*外的极值指数均呈上升趋势，呈增暖趋势；2012年之后，极端气温指数的变化与1960—1997年阶段相似，也表现出增暖趋势，hiatus事件期间的极端气温指数变化与两个时段相比，冷指数均呈上升趋势，除*TR*20外的暖指数和极值指数均呈下降趋势，呈降温趋势，可见极端气温指数的变化响应了1988—2012年的hiatus事件。

chinaXiv:202101.00024v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202101.00024v1

表3　极端气温指数的突变分析

Tab. 3　Summary on the mutation analysis of extreme temperature indices

指数	研究区		东北		华北		西北	
	突变时间	趋势	突变时间	趋势	突变时间	趋势	突变时间	趋势
*FD*0	1993	↓	1981	↓	1990	↓	1998	↓
*ID*0	1987	↓	1978	↓	1988	↓	1990	↓
*SU*25	1997	↑	1998	↑	1997	↑	2000	↑
*TR*20	1998	↑	1995	↑	1999	↑	1999	↑
*TN*90*P*	1994	↑	1988	↑	1997	↑	1997	↑
*TX*90*P*	1997	↑	1993	↑	1999	↑	1998	↑
*TN*10*P*	1989	↓	1983	↓	1989	↓	1988	↓
*TX*10*P*	1994	↓	1992	↓	1992	↓	1994	↓
TXx	1996	↑	1996	↑	1997	↑	1999	↑
TXn	1987	↑	1987	↑	1987	↑	1985	↑
TNn	1981	↑	1987	↑	1985	↑	1981	↑
TNx	1997	↑	1993	↑	1997	↑	1999	↑
DTR	1980	↓	1981	↓	1989	↓	1981	↓
GSL	1998	↑	1988	↑	2000	↑	1995	↑
CSDI	1980	↓	1981	↓	1979	↓	1982	↓
WSDI	1996	↑	1996	↑	1996	↑	1997	↑

注：“↑”表示发生由少到多的突变，“↓”表示发生由多到少的突变

表4　hiatus事件期间以及前后时段极端气温指数变化趋势[(d·(10 a)$^{-1}$或℃·(10 a)$^{-1}$)]

Tab. 4　Variation trend of extreme temperature indices during and before and after hiatus events[(d·(10 a)$^{-1}$or℃·(10 a)$^{-1}$)]

时段	*FD*0	*ID*0	*SU*25	*TR*20	*TN*90*P*	*TX*90*P*	*TN*10*P*	*TX*10*P*
1960—1997	−2.33**	−2.47**	0.25	0.37	1.80*	0.47	−4.54*	−1.37*
1998—2012	1.24	6.86*	−0.94	0.51	−1.20	−5.74	0.95	1.84
2013—2017	−5.05	−9.87	4.99	9.78	17.24	7.59	−2.79	−6.36

时段	*TXx*	*TXn*	*TNn*	*TNx*	*DTR*	*GSL*	*CSDI*	*WSDI*
1960—1997	−0.09	0.67**	0.92**	0.07	−0.22**	1.51	−1.45**	0.39
1998—2012	−0.30	−0.36	−0.47	−0.02	−0.29*	−2.41	0.47	−3.38
2013—2017	4.10	3.64	4.16	2.74	−0.24	2.95	0.92	−3.72

2.5　极端气温影响因素分析

2.5.1　地理位置　由表5可知大部分极端气温指数变化与经度、纬度、海拔显著相关，其中与海拔的相关性较高。

*FD*0、*CSDI*和*SU*25与海拔呈显著负相关，与经度呈显著正相关，表明海拔越高越靠西，*FD*0和*CSDI*降幅越大，*SU*25升幅越小；*ID*0和*TX*10*P*与海拔呈显著负相关，与经度和纬度呈显著正相关，说明海拔越高越靠西南部，*ID*0和*TX*10*P*的降幅越大；*TN*10*P*与海拔和纬度呈显著负相关，与经度呈正相关，说明海拔越高越靠西北部，*TN*10*P*降幅越大；*TN*90*P*和*WSDI*与海拔呈显著正相关、与经度呈显著负相关，表明海拔越高越靠西，*TN*90*P*和*WSDI*升幅越大；*TX*90*P*与海拔呈显著正相关，与经度和纬度呈显著负相关，表明海拔越高越靠西南部，*TX*90*P*升幅越大；*TNx*与海拔和纬度呈显著正相关，与经度呈显著负相关，表明海拔越高越靠西北部，*TNx*升幅越大。*GSL*与海拔呈显著正相关，与纬度呈显著负相关，表明在低纬度高海拔地区*GSL*升幅越大。综上可知多数指数在高海拔偏西的地区变化幅度较大，进一步证明在西北地区变化幅度较大。

2.5.2　大气环流指数　结果表明(表6)，冷指数、极端低值指数以及*DTR*、*GSL*与*AO*指数的相关性通过了显著性检验；极端低值指数与*NAO*指数的相关性通过了显著性检验。*SOI*指数与所有极端气温指数的相关系数较低且不显著，而*MEI*指数与*ID*0、*CS*-

ChinaXiv合作期刊

表5 北方地区极端气温指数变化趋势与地理位置的相关性

Tab. 5 Correlation coefficient between the linear trends in extreme temperature indices and geographical parameters in the northern China

指数	经度	纬度	海拔	指数	经度	纬度	海拔
*FD*0	0.10*	0.09	-0.15**	*TXx*	-0.02	0.08	0.28**
*ID*0	0.21**	0.19*	-0.58**	*TXn*	-0.04	0.19**	0.02
*SU*25	0.12*	0.06	-0.18**	*TNn*	0	0.22**	-0.08
*TR*20	0.08	-0.04	-0.41**	*TNx*	-0.15**	0.20**	0.13**
*TN*90*P*	-0.16*	-0.03	0.11*	*DTR*	0	-0.30**	0.12*
*TX*90*P*	-0.25**	-0.13*	0.39**	*GSL*	-0.06	-0.24**	0.25**
*TN*10*P*	0.11*	-0.10*	-0.11*	*CSDI*	0.32**	-0.09	-0.16**
*TX*10*P*	0.13**	0.11*	-0.31**	*WSDI*	-0.28**	-0.06	0.32**

表6 大气环流指数与极端气温指数的相关性

Tab. 6 Correlation between atmospheric circulation indices and extreme temperature indices

指数	*FD*0	*ID*0	*SU*25	*TR*20	*TN*90*P*	*TX*90*P*	*TN*10*P*	*TX*10*P*
AO	-0.37**	-0.35**	0.10	0.11	0.24	0.06	-0.41**	-0.46**
NAO	-0.10	-0.21	-0.08	-0.14	0	-0.10	-0.16	-0.18
MEI	-0.20	-0.34*	0.10	-0.16	0.15	0.22	-0.15	-0.14
SOI	0.08	0.22	-0.06	0.23	-0.02	-0.11	0	0.07

指数	*TXx*	*TXn*	*TNn*	*TNx*	*DTR*	*GSL*	*CSDI*	*WSDI*
AO	-0.04	0.45**	0.41**	0.09	-0.30*	0.32*	-0.27*	0.03
NAO	-0.12	0.36**	0.35**	-0.06	-0.15	0.07	-0.21	-0.11
MEI	-0.01	0.12	0.24	-0.09	-0.05	0.22	-0.33*	0.27*
SOI	0.08	-0.05	-0.12	0.17	-0.09	-0.10	0.20	-0.13

DI、*WSDI*的相关性通过了显著性检验，*SOI*和*MEI*均是表征*ENSO*的指数，故*ENSO*指数对*ID*0、*CSDI*和*WSDI*的影响较大，*ENSO*指数对其他气温指数的影响较小，其原因可能是在长时间序列的研究中，由于*ENSO*事件的滞后性等特征，其对区域年际气温变化的影响程度不显著[33]。综上得出：*AO*指数对研究区极端气温指数的影响最强，其次为*NAO*指数和*ENSO*指数，而3种指数对极端气温冷指数的影响较大，其中*AO*指数对极端气温冷指数影响更明显。

2.5.3 气溶胶光学厚度(*AOD*) 由图7，2007—2016年北方地区*AOD*呈下降趋势，同期极端气温指数变化见表7，2007—2016年，*AOD*呈减少趋势，极端高温事件增多，极端低温事件减少；年均值的同期相关性表明，*AOD*与多数冷指数呈负相关，与多数暖指数呈正相关，同时*AOD*与各极端气温指数相关性较低且不显著。有研究[17]表明*AOD*与极端气温的相关性有很强的区域差异性，故区域平均情况不能代表整个北方地区的特征，在今后研究中还需深入探究*AOD*与极端气温相关性的区域特征。

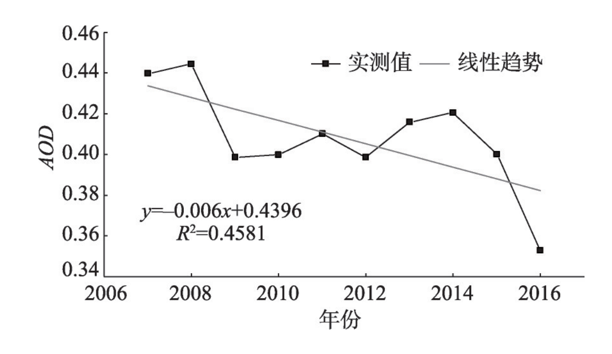


图7 2007—2016年北方地区*AOD*变化趋势

Fig. 7 Trends of *AOD* from 2007 to 2016

3 讨论

关于极端气温的变化特征，前人[5-12]研究表明极端冷事件逐渐减少、极端暖事件逐渐增多，本文的研究结果佐证了前人的研究。本文在前人[11-12]的基础上利用更多的气象站点、采用更多的极端气温指数、运用更多的数理方法来研究北方地区极端气温变化特征，使研究结果更加明确、更加精细，能更加全面得反映北方地区极端气温的变化特征，同时有助于描述某一分区极端气温的变化情况，也能为制定应对气候变化的策略提供依据，近而减轻极端

chinaXiv:202101.00024v1

ChinaXiv合作期刊

表7 2007—2016年极端气温指数变化趋势[d·(10 a)$^{-1}$]或[℃·(10 a)$^{-1}$)]与*AOD*相关性分析

Tab. 7 Trend of extreme temperature indices and its correlation with *AOD* from 2007 to 2016

指数	变化趋势	相关系数	指数	变化趋势	相关系数
*FD*0	−2.13	−0.09	*TXx*	0.11	−0.21
*ID*0	−0.79	−0.22	*TXn*	−0.84	0.46
*SU*25	0.44	0.06	*TNn*	−0.30	0.35
*TR*20	0.79	−0.36	*TNx*	0.71	−0.57
TN90P	6.02	−0.36	*DTR*	−0.10	0.57
TX90P	0.92	0.03	*GSL*	1.31	0.25
TN10P	−0.16	−0.23	*CSDI*	−0.75	0.13
TX10P	−3.12	−0.16	*WSDI*	−0.31	0.26

气温事件对当地生产生活造成的不利影响和保障农业生产安全。

影响极端气温变化的因素较复杂，极端气温指数变化不仅受地理位置的影响，有研究[10]表明地形也影响极端气温变化，上文研究也能得出不同地形区极端气温变化存在差异，北方地区地形复杂，在今后还需对不同地形区进行研究来探索地形对北方地区极端气温的影响。区域气候变化受到大气环流的影响，大气环流对极端气候事件的发生具有重要影响，汪子琪[15]等指出厄尔尼诺事件使冬季中国东北日平均气温偏低，极端低温事件频次增多，而拉尼娜事件对极端低温的影响较弱，由于不同区域气候对各环流指数的响应不同，在今后的研究中需在机理上研究各环流指数对北方地区不同区域极端气温的影响。关于*AOD*与极端气温指数的相关分析结果佐证了胡婷[17]的研究，本研究采用指数较多更能深入了解*AOD*与极端气温事件的关系。胡婷的研究还表明*AOD*对气温有一定的降温作用同时还有季节性差异，*AOD*对极端气温的影响较复杂，在本研究中*AOD*与极端气温指数的相关性均不明显，故在今后还需要用更长时间序列的*AOD*来深入探究*AOD*对北方地区极端气温的影响。

4 结 论

本文运用了16个极端气温指数来研究北方地区极端气温事件的时空变化特征及其影响因素，得出以下主要结论：

(1) 近58 a北方地区及其子区域极端气温指数的变化趋势一致：暖指数和极值指数呈上升趋势，冷指数和*DTR*呈下降趋势，在变化幅度上，冷指数大于暖指数，夜指数大于昼指数，说明研究区近58 a的气温升高，最低气温升温的贡献是主要的。不同地区极端气温变化存在差异：极端气温指数在西北地区变化幅度最大，东北地区变化幅度最小。

(2) 北方地区及其子区域极端气温指数突变主要发生在20世纪80年代和90年代，暖指数和极高值指数的突变时间晚于冷指数和极低值指数，突变后极端暖事件和气温极值事件进入多发阶段，极端冷事件进入少发阶段；不同地区突变时间也存在差异：东北地区极端气温指数突变时间最早，西北地区最晚。

(3) hiatus事件期间，冷指数呈上升趋势，除*TR*20外的暖指数和极值指数呈下降趋势，呈现出降温趋势，说明极端气温指数的变化响应了hiatus事件。

(4) 对极端气温的影响因素分析中，多数极端气温指数与经纬度、海拔高度显著相关，其中与海拔高度相关性较高；*AO*指数对北方地区极端气温的影响最明显，其次是*NAO*指数和*ENSO*指数，这3种指数对极端气温冷指数的影响较大，其中*AO*指数对极端气温冷指数影响更明显；2007—2016年间，*AOD*呈减少趋势，极端高温事件增多，极端低温事件减少，*AOD*与多数冷指数呈负相关，与多数暖指数呈正相关，相关性均不显著。

参考文献(References)

[1] 汪宝龙, 张明军, 魏军林, 等. 西北地区近50 a气温和降水极端事件的变化特征[J]. 自然资源学报, 2012, 27(10): 1720−1733. [WANG Baolong, ZHANG Mingjun, WEI Junlin, et al. The change in extreme events of temperature and precipitation over north-west China in recent 50 years[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(10): 1720−1733.]

[2] TAYLOR K E, STOUFFER B J, MEEHL G A. An overview of CMIP5 and the experiment design [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(4): 485−498.

[3] SUPARI, FREDOLIN T, LIEW J, et al. Observed changes in extreme temperature and precipitation over Indonesia[J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(4): 1979−1997.

[4] KARL T R, KUKLA G, RAZUVAYEV V N, et al. Global warming: Evidence for asymmetric diurnal temperature change[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 18(12): 2253−2256.

[5] 李红英, 高振荣, 王胜, 等. 近60 a河西走廊极端气温的变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(1): 1−9. [LI Hongying, GAO Zhenrong, WANG Sheng, et al. Extreme temperature variation of Hexi Corridor in recent 60 years[J]. Arid Land Geography, 2015,

chinaXiv:202101.00024v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202101.00024v1

38(1): 1-9.]

[6] 王琼, 张明军, 王圣杰, 等. 1962-2011年长江流域极端气温事件分析[J]. 地理学报, 2013, 68(5): 611-625. [WANG Qiong, ZHANG Mingjun, WANG Shingjie, et al. Extreme temperature events in Yangtze River Basin during 1962-2011[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(5): 611-625.]

[7] YU Z, LI X L. Recent trends in daily temperature extremes over northeastern China (1960-2011) [J]. Quaternary International, 2015, 380-381: 35-48.

[8] 薛海丽, 张钦, 唐海萍. 近60 a内蒙古不同草原类型区极端气温和干旱事件特征分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41(4): 701-711. [XUE Haili, ZHANG Qin, TANG Haiping. Extreme temperature and drought events in four different grassland areas of Inner Mongoliain in recent 60 years[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(4): 701-711.]

[9] 贾艳青, 张勃, 张耀宗, 等. 长江三角洲地区极端气温事件变化特征及其与ENSO的关系[J]. 生态学报, 2017, 37(19): 6402-6414. [JIA Yanqing, ZHANG Bo, ZHANG Yaozong, et al. Correlation analysis of variation of extreme temperature events and El Nino Southern Oscillation (ENSO) in Yangtze River Delta region during 1960-2014[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(19): 6402-6414.]

[10] 高文华, 李开峰, 崔豫. 1960-2014年河南极端气温事件时空演变分析[J]. 地理科学, 2017, 37(8): 1259-1269. [GAO Wenhua, LI Kaifeng, CUI Yu. Temporal and spatial variation of extreme temperature events in Henan Province during 1960-2014[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(8): 1259-1269.]

[11] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近50年温度和降水极端事件变化[J]. 地理学报, 2003, 58(S1): 1-10. [ZHAI Panmao, PAN Xiaohua. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(S1): 1-10.]

[12] 马柱国, 符淙斌, 任小波, 等. 中国北方年极端温度的变化趋势与区域增暖的联系[J]. 地理学报, 2003, 58(S1): 11-20. [MA Zhuguo, FU Congbin, REN Xiaobo, et al. Trend of annual temperature and its relationship to regional warming in northern China[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(S1): 11-20.]

[13] RENOM M, RUSTICUCCI M, BARRERIO M. Multidecadal changes in the relationship between extreme temperature events in Uruguay and the general atmospheric circulation[J]. Climate Dynamics, 2011, 37(11-12): 2471-2480.

[14] LI L, LI C Y, SONG J. Arctic Oscillation anomaly in winter 2009-2010 and its impacts on weather and climate[J]. Science China: Earth Sciences, 2012, 55(4): 567-579.

[15] 汪子琪, 张文君, 耿新. 两类ENSO对中国北方冬季平均气温和极端低温的不同影响[J]. 气象学报, 2017, 75(4): 564-580. [WANG Ziqi, ZHANG Wenjun, GENG Xin. Different influences of two types of ENSO on winter temperature and cold extremes in northern China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2017, 75(4): 564-580.]

[16] ZHAO M, PITMAN A J. The impact of land cover change and increasing carbon dioxide on the extreme and frequency of maximum temperature and convective precipitation[J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(6): 1-4.

[17] 胡婷. 中国区域气溶胶的光学厚度特征和气候效应研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008. [HU Ting. Variations in aerosol optical thickness and its effects on climate over China[D]. Nanjing: NanJing University of Information Science &Techology, 2008.]

[18] 艳青, 张勃, 张耀宗, 等. 城市化对长三角地区极端气温影响的时空分异研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(5): 814-828. [JIA Yanqing, ZHANG Bo, ZHANG Yaozong, et al. Effect of urbanization on spatial and temporal variation of extreme temperature events in theYangtze River delta[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(5): 814-828.]

[19] WI L Y, ZHANG J Y, DONG W J. Vegetation effects on mean daily maximum and minimum surface air temperatures over China[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(9): 900-905.

[20] YOU Q L, KANG S C, AGUILAR E, et al. Changes in daily climate extremes in the eastern and central Tibetan Plateau during 1961-2005[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113: D07101.doi: 10. 1029/2007jd009389.

[21] 陈隆勋, 邵永宁, 郭清芬, 等. 近40年我国气候变化的初步分析[J]. 应用气象学报, 1991, 2(2): 164-174. [CHEN Longxun, SHAO Yongning, GUO Qingfen, et al. Preliminary analysis of climatic change during the last 39 years in China[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1991, 2(2): 164-174.]

[22] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 43-47. [WEI Fengying. Diagnose and forecast technology of modern climate statistics[M]. Beijing: China meteorological Press, 1999: 43-47.]

[23] MANN H B. Nonparametric test against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.

[24] KENDALL M G. Rank correlation measures[M]. London: Charles Griffin, 1975: 202.

[25] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992, 16(4): 482-493. [FU Congbin, WANG Qiang. The definition of climate change and detection methods[J]. Atmospheric Science, 1992, 16(4): 482-493.]

[26] 贺伟, 布仁仓, 熊在平, 等. 1961-2005年东北地区气温和降水变化趋势[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 519-531. [HE Wei, BU Rencang, Xiong Zaiping, et al. Characteristics of temperature and precipitation in northeastern China from 1961 to 2005[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 519-531.]

[27] 郭志梅, 缪启龙, 李雄. 中国北方地区近50年来气温变化特征的研究[J]. 地理科学, 2005, 25(4): 448-454. [GUO Zhimei, MIU Qilong, LI Xiong. Variation characteristics of temperature over North China in recent 50 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(4): 448-454.]

[28] YOU Q L, KANG S C, Aguilar E, et al. Changes in daily climate extremes in China and its connection to the large scale atmospheric circulation during 1961-2003[J]. Climate Dynamics, 2010, 36 (11-12): 2399-2417.

ChinaXiv合作期刊

[29] ALEXANDER L V, ZHANG X, PETERSON T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111(D5): 1042-1063.

[30] 尹云鹤, 吴绍洪, 陈刚, 1961-2006年我国气候变化趋势与突变的区域差异[J]. 自然资源学报, 2009, 24(12): 2147-2157. [YIN Yunhe, WU Shaohong, CHEN Gang. Regional difference of climate trend and abrupt climate change in China during 1961-2006 [J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(12): 2147-2157.]

[31] KNIGHT J, KENNEBY J J, FILLAND C, et al. Do global temperature trends over the last decade falsify climate predictions?[J] Bulletin of the American Meteorological Society, 2009, 90(8): 22-23.

[32] KERR RA. What happened to global warming? Scientists say just wait a bit[J]. Science, 2009, 326(5949): 28-29.

[33] 徐静. ENSO事件对青海省旱涝灾害影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013. [XU Jing. The impact of ENSO events to droughts and floods in Qinghai Provice[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2013.]

chinaXiv:202101.00024v1

Temporal and spatial changes of extreme temperature and its influencing factors in northern China in recent 58 years

JIAO Wen-hui, ZHANG Bo, MA Bin, CUI Yan-qiang, HUANG Hao, WANG Xiao-dan

(*College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou* 730070, *Gansu, China*)

Abstract: Under the background of global warming, the disaster events (drought, heat wave, freezing, cold wave, etc.) caused by extreme temperature changes are also becoming more and more frequent, which pose a serious threat to industrial and agricultural production, human life and property. Therefore, extreme temperature changes have gradually caused widespread concern. Based on the daily temperature (maximum, minimum) data of 404 stations in northern China from 1960 to 2017, 16 extreme temperature indices are calculated by RclimDex1.0 of R. Using the methods of linear regression, Mann-Kendal test, sliding t-test, cumulative anomaly and correlation analysis to analyze spatial-temporal variation characteristics of extreme temperature events, and exploring the influencing factors of temperature indices. The results show that: (1) An upward trend in warm extremes and extremal indices, and a downward trend in cold extremes as well as diurnal temperature range (DTR); the magnitudes of changes in cold extremes are obviously higher than those of warm extremes，the magnitudes of changes in night extremes are higher than those of day extremes; The warming in the northwest region is the most obvious, and the warming in the northeast region is not obvious; (2) The mutation time of the extreme temperature indices mainly occurred in the 1980s and 1990s. Additionally, the cold extremes and minimum values of daily maximum (minimum) temperature mutated earlier than those of the warm extremes and maximum values of daily maximum (minimum) temperature. After the mutation, the extreme warm events and extreme value events tended to occur frequently, whereas the occurrence of extreme cold events decreased gradually. The extreme temperature indices in the northeast region has the earliest mutation time, the northwest region has the latest mutation time; (3) The changes of extreme temperature indices responds to the global warming hiatus during 1988 to 2012; (4) Most extreme temperature indices show close correlation with longitude, latitude and altitude; (5) The Arctic Oscillation (AO) index has the strongest impact on extreme temperatures and the most significant impact on the cold index; (6) During the 2007 to 2016, a downward trend in Aerosol Optical thickness (AOD), extreme high temperature events increased and extreme low temperature events decreased. Most cold indices were negatively correlated with AOD, and most warm indexes were positively correlated with AOD. This study analyzes the variation characteristics of extreme temperature in the northern China, aims to understand the trend of extreme temperature change deeply, carry out meteorological disaster prediction, early warning research, reduce the adverse impact of extreme temperature events on local production and life, and ensure the safety of agricultural production.

Key words: extreme temperature; temporal and spatial variation; influencing factors; northern China